

PENGARUH TEGANGAN SISA TERHADAP KUAT BATAS BATANG DESAK

Oleh :

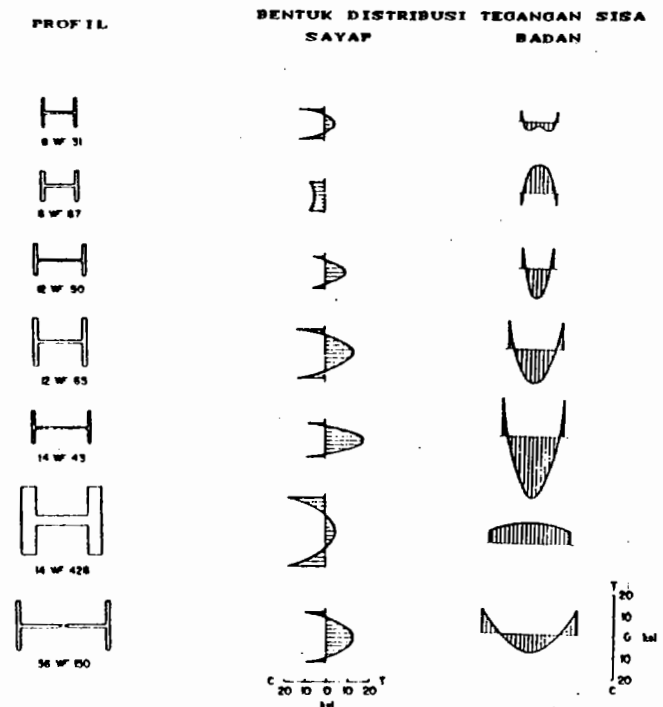
Dr. Ir. Morisco *)

Intisari

Studi tentang pengaruh tegangan sisa pada kuat batas batang desak dari baja WF telah dilakukan, mempergunakan program komputer BECOL yang disusun oleh Morisco (1986). Dalam studi dipergunakan tegangan sisa dengan distribusi sesuai usulan Ketter (1955). Tegangan maksimal pada bagian desak sebesar 30% tegangan leleh. Hasil yang diperoleh menyatakan, bahwa reduksi kuat batas batang desak akibat tegangan sisa, dipengaruhi oleh kelangsingan batang. Reduksi terbesar yang dicapai hanyalah sekitar 4 persen.

Pengantar

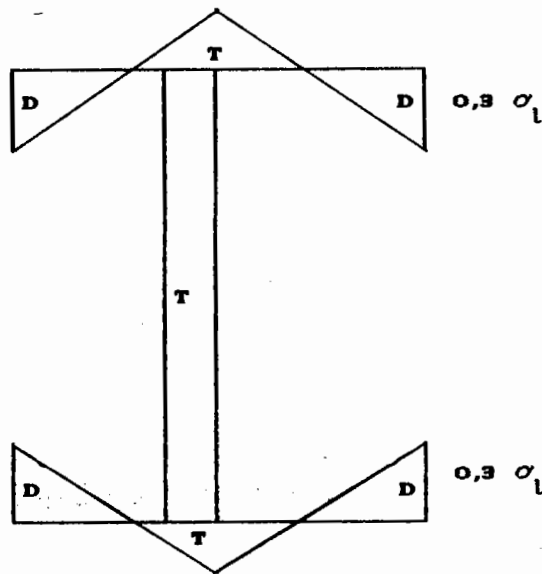
Tegangan sisa adalah tegangan yang masih tertinggal di dalam batang struktur sebagai akibat pemrosesan di pabrik. Baik pada baja struktur yang dibentuk dengan cara penggilasan, ataupun yang dibuat dengan pengelasan, tegangan sisa terjadi sebagai akibat pendinginan yang tidak bersamaan. Pada bagian profil yang dingin paling awal, akan terjadi tegangan desak. Sedang pada bagian yang dingin paling akhir, memperoleh tegangan tarik. Pada potongan berlaku persyaratan kesetimbangan, sehingga resultan gaya pada bagian tarik diimbangi oleh resultan gaya bagian desak. Selain itu, tegangan sisa dapat pula terjadi sebagai akibat pembungkakan atau pelurusan yang dilakukan dalam keadaan dingin. Menurut Brockenbrough dan Johnston (1981), tegangan sisa pengaruh pendinginan yang tidak serempak ini, seragam untuk sepanjang batang, sedang tegangan sisa akibat pengerjaan secara dingin, hanya terdapat di sekitar pembungkakan/pelurusan saja, sehingga tegangan sisa akibat pendinginan yang tidak serempak perlu memperoleh perhatian lebih banyak. Berdasarkan hasil penelitian Fujita (1956), distribusi tegangan sisa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi tegangan sisa pada profil WF sesuai dengan Fujita (1956)

*)Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM

Tegangan sisa perlu diperhitungkan dalam perancangan batang struktur baja agar struktur yang dibuat cukup aman. Hasil penelitian yang menyatakan pengaruh tegangan sisa pada kuat batas batang struktur masih langka. Oleh karena itu suatu penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh tegangan sisa, khususnya pada kuat batas batang desak. Dalam studi ini dipergunakan tegangan sisa dengan distribusi linier, sesuai dengan usulan Ketter dkk (1955), seperti terlihat pada Gambar 2, dan yang dipakai sebagai dasar dalam AISC. Jika pengaruh tegangan sisa ini dapat diketahui, maka perancangan batang struktur akan dapat dilakukan lebih teliti, sehingga diperoleh hasil struktur yang hemat dan aman.



Gambar 2. Tegangan sisa dengan distribusi linier sesuai dengan Ketter (1955)

Dalam studi ini, analisis numeris kuat batas batang desak dari baja dilakukan sebagai berikut ini. Pertama-tama analisis dilakukan dengan mengabaikan pengaruh tegangan sisa, selanjutnya disusul analisis dengan memperhitungkan pengaruh tegangan sisa. Pengaruh tegangan sisa adalah selisih antara kedua hasil analisis tersebut. Studi dilakukan pada batang baja dengan angka kelangsingan 30—200. Analisis dilakukan dengan program komputer BECOL. Pada tulisan ini, teori dasar program komputer BECOL hanya diuraikan sepintas, sekedar untuk memberi gambaran secara garis besar saja, sedang uraian selengkapnya dapat dilihat dalam disertasi Morisco (1986).

Program Komputer BECOL

Program komputer BECOL, khusus dibuat untuk analisis stabilitas batang desak dengan sendi pada kedua ujungnya. Analisis stabilitas dilakukan sampai keadaan inelastis bahan tercapai, dengan gaya aksial, lateral dan momen ujung.

Untuk menyederhanakan penyelesaian, hitungan kuat batas batang mempergunakan beberapa asumsi. Lendutan batang cukup kecil, sehingga kelengkungan dapat didekati dengan turunan kedua dari lendutan. Garis kerja gaya-gaya dianggap melewati sumbu batang. Tegangan geser tidak diperhitungkan dalam menentukan terjadinya tegangan leleh. Modulus geser G dianggap tetap, seperti pada keadaan elastis. Selanjutnya, *local-buckling* tidak diperhitungkan.

Pada program BECOL, hubungan tegangan-regangan yang diperoleh dari hasil pengujian bahan, dapat didekati secara baik dengan diagram multilinier, sehingga pengaruh *strain-hardening* dapat disertakan. Cara ini cukup baik jika dipergunakan untuk memperbandingkan antara teori dengan hasil eksperimen.

Dengan program BECOL, analisis kuat batas dapat dilakukan dengan memperhitungkan tegangan sisa (*residual stress*). Mula-mula tegangan sisa ditransformasikan menjadi regangan. Selanjutnya, regangan tersebut dijumlahkan dengan regangan yang terjadi sebagai akibat kelengkungan batang, sehingga diperoleh regangan total. Dengan regangan total serta berdasarkan diagram tegangan regangan, maka tegangan pada bagian-bagian penampang dapat ditentukan.

Tinjauan stabilitas diadakan pada beberapa titik nodal sepanjang sumbu batang. Mula-mula dikerjakan beban dengan porsi kecil. Sebagai pengaruh pembebanan, titik-titik nodal akan berubah tempat yang dapat dinyatakan dalam arah sumbu X dan Y. Posisi titik-titik nodal ditetapkan dengan cara coba-coba (*trial and error*).

Dengan metoda beda hingga, kelengkungan batang dapat ditentukan berdasarkan posisi titik-titik nodal tersebut. Selanjutnya, momen-dalam (*internal-moment*) pada setiap titik nodal dapat dihitung berdasarkan hubungan *moment thrust-curvature*. Dalam hal ini integrasi dilakukan dengan Gauss quadrature. Lebih lanjut, dengan posisi titik-titik nodal yang sama, dapat pula dihitung besar momen-luar (*external-moment*) sebagai pengaruh pembebanan.

Dari hitungan momen-luar dan momen-dalam tersebut di atas, diadakan tinjauan stabilitas batang struktur. Dalam keadaan setimbang, resultan antara momen-luar dan momen-dalam harus nol. Jika persyaratan kesetimbangan ini tidak dipenuhi, maka perlu diadakan koreksi posisi titik-titik nodal. Koreksi dilakukan dengan metoda iterasi Newton-Raphson. Setelah koreksi dilakukan, tinjauan stabilitas batang dapat diulang dengan posisi titik nodal yang baru. Langkah-langkah tersebut di atas diulang beberapa kali, sehingga kesalahan yang diperoleh memenuhi toleransi yang ditetapkan. Jika persyaratan kesetimbangan telah dapat terpenuhi, beban dapat ditingkatkan, untuk kemudian langkah-langkah tinjauan stabilitas tersebut di atas dikerjakan lagi.

Jika koreksi telah dilakukan beberapa kali, misalnya saja lima puluh kali, tetapi persyaratan kesetimbangan tetap tidak dapat dipenuhi, maka dapat dinyatakan bahwa batang struktur tidak kuat memikul beban tersebut. Beban terakhir yang masih memenuhi persyaratan kesetimbangan dinyatakan sebagai beban batas.

Validasi Program BECOL

Suatu metoda hitungan, untuk dapat dipakai dalam penelitian, perlu diadakan validasi terlebih dahulu. Validasi dapat dilakukan dengan membandingkan hasilnya dengan hasil penelitian terdahulu yang menggunakan metoda lain.

Untuk validasi, maka hasil hitungan program BECOL telah diperbandingkan dengan hasil eksperimen Binrstiel (1968). Agar lebih obyektif, maka hasil hitungan juga diperbandingkan dengan hasil hitungan dengan metoda yang dikemukakan oleh Harstead dkk (1968), Sharma dan Gaylord (1969), serta Syal dan Shatma (1971).

Lebih lanjut, validasi program komputer BECOL juga diadakan dengan hasil eksperimen Morisco (1986), yang dilakukan pada delapan model dari profil UC 203 x 203 x 46, dengan panjang 4 m dan 6 m. Dalam eksperimen, dipergunakan beban berupa momen-momen ujung yang konstan. Selain itu, juga dikerjakan gaya aksial yang mula-mula kecil, kemudian diperbesar sedikit demi sedikit sampai batang struktur runtuh. Gaya dan momen pada eksperimen ini diperoleh dengan jack dan pompa hidrolik. Pengamatan selama eksperimen dilakukan secara manual dan diperlengkapi pula pencatat otomatis dengan komputer.

Studi Parameter Pengaruh Tegangan sisa

Umum

Untuk studi parameter pengaruh tegangan sisa terhadap kuat batas batang desak, maka program BECOL telah dipergunakan untuk analisis kuat batas batang struktur baja terhadap gaya aksial.

Jenis Profil

Berdasarkan pertimbangan ukuran penampang saja, profil WF 8 x 31 dipilih sebagai bahan studi. Hal ini mengingat bahwa menurut Chen (1976), profil tersebut dapat mewakili sebagian besar profil yang banyak dipakai. Lebih lanjut Chen (1976) menyatakan bahwa grafik yang dihasilkan dengan profil WF 8 x 31 tidak menyimpang jauh jika dibandingkan dengan profil WF lainnya, dan memberikan faktor aman lebih besar kepada penampang lain yang mempunyai faktor bentuk (*shape-factor*) 1,10.

Jenis Baja

Dalam studi dipergunakan baja dengan tegangan leleh sebesar 355 mPa dan modulus elastis $E = 205000$ mPa. Diagram tegangan-regangan dipilih berbentuk bilinear, agar hasil yang diperoleh cukup aman jika dipergunakan untuk perancangan.

Kelengkungan Awal

Batang struktur diperhitungkan mempunyai kelengkungan awal terhadap sumbu lemah profil dan berbentuk sinusoidal. Khusus pada batang dengan angka kelangsingan kurang dari 15, kelengkungan awal, dianggap nol, sedang untuk batang dengan angka kelangsingan lebih dari 15, digunakan simpangan awal u_0 di tengah-tengah bentang sesuai dengan ketentuan BS-5400, sebagai berikut :

$$u_0 = 0,009 \left(\frac{r^2}{d} \right) (\lambda - 15)$$

di mana :

d = tinggi profil

r = jari-jari inertia terhadap sumbu lemah

λ = kelangsingan batang

Tegangan Sisa

Analisis kuat batas dilakukan dengan dua penyelesaian. Penyelesaian pertama memperhitungkan tegangan sisa pada bagian desak maksimal sebesar 0,3 δ , dengan distribusi seperti terlihat pada Gambar 2, sedang pada penyelesaian kedua, tegangan sisa tidak diperhitungkan. Penyelesaian dalam dua macam ini dimaksudkan untuk memperlihatkan seberapa jauh pengaruh tegangan sisa terhadap kuat batas batang desak.

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Perbandingan hasil-hasil hitungan nominal disajikan pada Tabel 1, sedang pada Tabel 2 disajikan hasil hitungan secara relatif. Dari hasil hitungan mempergunakan program BECOL dan beberapa hasil penelitian terdahulu, maka diperoleh kuat batas rata-rata sebagai hasil eksperimen Birnstiel (1968) sebesar 1,004 dengan simpangan baku 0,034, Harstead (1968) memperoleh hasil rata-rata 1,015 dengan simpangan baku 0,034. Sharma dan Gaylord (1969) menghasilkan nilai rata-rata 0,960 dengan simpangan baku 0,051, sedang Syal dan Sharma (1971) memperoleh harga hasil rata-rata sebesar 1,006 dengan simpangan baku 0,038. Dari hasil-hasil tersebut, terbukti bahwa program BECOL dapat memberikan hasil yang cukup dekat dengan hasil penelitian terdahulu.

Tabel 1. Perbandingan kuat batas batang desak (Kips) dari berbagai hasil penelitian

No.	Eksperi- men Birn- stiel (1968)	Harstead dll (1968)	Sharma & Gaylord (1969)	Syal & Sharma (1971)	Program BECOL
1.	92,80	92,80	93,40	93,10	92,50
2.	54,10	52,60	49,90	50,75	51,41
3.	62,70	62,80	58,30	60,84	59,84
4.	86,30	83,30	83,60	84,35	82,82
5.	49,60	52,70	51,40	50,20	53,01
6.	47,90	49,40	49,20	47,76	49,41
7.	76,60	79,30	70,40	80,16	81,72
8.	109,40	110,30	98,00	110,10	112,73
9.	85,00	80,50	75,70	78,70	76,22
10.	51,00	55,70	51,50	56,23	56,24
11.	46,10	45,00	42,70	47,24	43,59
12.	38,70	41,20	37,20	40,12	38,13

Tabel 2. Kuat batas batang desak dari berbagai penelitian relatif terhadap hasil analisis dengan Program BECOL

No.	Eksperi- men Birn- stiel (1968)	Harstead dll (1968)	Sharma & Gaylord (1969)	Syal & Sharma (1971)	Program BECOL
1.	1,003	1,003	1,010	1,006	1,000
2.	1,052	1,023	0,971	0,987	1,000
3.	1,048	1,049	0,974	1,017	1,000
4.	1,042	1,006	1,009	1,018	1,000
5.	0,936	0,994	0,970	0,947	1,000
6.	0,969	1,000	0,996	0,967	1,000
7.	0,937	0,970	0,861	0,981	1,000
8.	0,970	0,978	0,869	0,977	1,000
9.	1,115	1,056	0,993	1,033	1,000
10.	0,907	0,990	0,916	1,000	1,000
11.	1,058	1,032	0,980	1,084	1,000
12.	1,015	1,081	0,976	1,052	1,000

Tabel 3 memperlihatkan hasil-hasil yang diperoleh secara eksperimen cukup dekat. Hasil rata-rata nilai relatif sebesar 1,075 dengan simpangan baku 0,107. Kesalahan maksimal sebesar 0,315 pada S4, terjadi karena terdapat eksentrisitas yang mengakibatkan momen dengan arah berlawanan terhadap momen ujung. Jika hasil ini dikeluarkan, maka hasil rata-rata menjadi 1,040 dengan simpangan baku 0,049.

Tabel 3. Perbandingan antara hasil analisis dan eksperimen kuat batas (kN)

Spesimen	Analisis	Eksperimen	(3) (2)
(1)	(2)	(3)	(4)
S1	1166,2	1185,0	1,016
S2	1447,5	1570,0	1,085
S3	1501,3	1520,0	1,012
S4	1137,2	1495,0	1,315
L1	935,0	1010,0	1,080
L2	1320,0	1270,0	0,962
L3	1020,0	1120,0	1,098
L4	832,7	860,0	1,033
Kuat batas rata-rata :			1,075
Simpangan baku :			0,107

Dari perbandingan hasil yang diperoleh dengan program komputer BECOL terhadap hasil hitungan cara lain ataupun hasil eksperimen, tampak kesesuaian yang cukup baik. Sehingga program BECOL dapat dipergunakan untuk penelitian lebih lanjut.

Hasil hitungan dengan atau tanpa mempertimbangkan tegangan sisa disajikan pada Tabel 4. Meskipun dalam analisis kuat batas diperhitungkan tegangan sisa 30% δ , pada bagian desak maksimal, tetapi hasil memperlihatkan, bahwa reduksi kekuatan pengaruh tegangan sisa hanyalah sekitar 4% pada batang gemuk. Hal ini dapat dimaklumi, karena resultan tegangan sisa pada tiap tampang adalah nol. Jika pada suatu tampang hanya terdapat gaya normal saja, setelah bagian desak leleh, pada tampang terjadi redistribusi tegangan dan kuat batas dicapai pada saat tampang leleh sepenuhnya. Dengan kata lain, tegangan sisa hanya berpengaruh jika pada tampang juga terdapat momen. Pada batang tekan, momen dapat timbul sebagai akibat eksentrisitas pengaruh kelengkungan awal. Lenturan yang timbul pada batang gemuk sebagai pengaruh pembebanan cukup kecil. Dengan demikian momen yang terjadi juga tidak besar. Sehingga pengaruh tegangan sisa juga tidak banyak. Sedang pada batang langsing, pengaruh tegangan sisa mendekati nol.

Kesimpulan

Dari pembahasan di atas, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil hitungan mempergunakan program BECOL tidak banyak menyimpang dari hasil penelitian terdahulu, sehingga dapat dipakai untuk penelitian lebih lanjut.
2. Pengaruh tegangan sisa terhadap kuat batas batang tekan dipengaruhi oleh kelangsingan batang.
3. Pada batang dengan kelangsingan tinggi, pengaruh tegangan sisa mendekati nol.
4. Reduksi kekuatan maksimal dicapai pada batang dengan kelangsingan rendah. Sekalipun besar tegangan sisa terbesar mencapai 30% δ , besar reduksi kekuatan maksimal hanyalah sekitar 4 persen.

Tabel 4. Perbandingan kuat batas batang desak

L	u_0	$\frac{P_0}{P_1}$	$\frac{P_s}{P_1}$	(4)
r				(3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
30	0,176	0,968	0,944	0,975
40	0,294	0,928	0,898	0,968
50	0,412	0,862	0,833	0,966
60	0,529	0,782	0,750	0,959
70	0,647	0,685	0,655	0,956
80	1,765	0,590	0,566	0,959
90	0,882	0,505	0,487	0,964
100	1,000	0,432	0,418	0,968
110	1,118	0,371	0,360	0,970
120	1,235	0,320	0,312	0,975
130	1,353	0,279	0,273	0,978
140	1,471	0,244	0,240	0,984
150	1,588	0,216	0,212	0,981
160	1,706	0,192	0,189	0,984
170	1,824	0,171	0,169	0,988
180	1,941	0,154	0,152	0,987
190	2,059	0,139	0,138	0,993
200	2,177	0,126	0,125	0,992

Keterangan :

- L = panjang batang (cm)
r = jari-jari inersia (cm)
 u_0 = lendutan awal batang (cm)
 P_0 = kuat batas batang dengan mengabaikan tegangan sisa
 P_s = kuat batas batang dengan memperhitungkan tegangan sisa
 P_1 = kuat batas batang dengan kelangsingan 0

Daftar Pustaka

- Morisco, Inelastic Behaviour of Steel Beam-Columns, *Dissertation*, The City University, London, 1986.
- Brockenbrough, R.L. and Johnston, B.G., *Steel Design Manual*, USS Corporation, Pittsburgh, 1981.
- Fujita, Y., Built Up Column Strength, *Dissertation*, Lehigh University, 1956.
- Ketter, R.L., Kaminsky, E.L. and Beedle, L.S., Plastic Deformation of Wide-Flange Beam-Columns, *Transaction*, ASCE, Vol. 120, 1955.
- Birnstiel, C., Experiments on H-Columns under Biaxial Bending, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 94, No. ST10, Proc. Paper 6186, Oct., 1968.
- Harstead, G.A., Birnstiel, C. and Leu, K.C., Inelastic H-Columns under Biaxial Bending, *Journal of The Structural Division*, ASCE, Vol. 94, No. ST10, Proc. Paper 6173, Oct, 1968.
- Sharma, S.S. and Gaylord, E., Strenght of Steel Columns with Biaxially Eccentric Load, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST12, Proc. Paper 6960, Dec., 1969.
- Syal, I.C. and Sharma, S.S., Biaxially Loaded Beam-Column Analysis, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 97, No. ST9, Proc. Paper, Sept., 1971.
- Chen, W.F. and Atsuta, T., Ultimate Strength of Biaxially Loaded Steel H-Columns, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 99, No. ST3, March., 1973.
- Chen, W.F. and Atsuta, T., *Theory of Beam-Columns*, Vol. 2, McGraw Hill Inc., New York, 1976.